

高磁感 Fe 基非晶软磁合金的进展

Advances in High Bs Fe-based Amorphous soft Magnetic alloys

陈国钧, 牛永吉, 彭伟峰, 高春红

北京北冶功能材料有限公司

摘要: 本文简要评述了高磁感低铁损 Fe 基非晶合金领域的最新进展。

关键词: 非晶态合金, 饱和磁感应, 铁损, 配电变压器

Abstract: Recent advance made in the area of Fe-based amorphous alloys exhibiting high magnetic inductions and low core losses are reviewed briefly in this paper.

Keywords: Amorphous alloy, saturation magnetic induction, core loss, distribution transformer

中图分类号: TM27 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2010)08-6-100

1 概况

作为典型的高科技产品, 非晶、纳米晶软磁合金带材的制造及其制品的使用过程都突显出优异的节能和环保特性, 是典型的“绿色制造”与“绿色应用”相结合的双“绿色”产业。

在日本, 由于“顶级运行”型超高效配电变压器在 2006~2007 年以来的大量上市推广应用 (所用铁芯材料为 Fe 基非晶合金或 0.23mm 厚细畴高取向硅钢); 由于日立金属于 2003 年收购了美国 Honeywell 公司的万吨级 Fe 基非晶合金生产厂 (Metglas Inc.) 并在此基础上进一步扩大产能 (2007 年为 5.2 万吨, 2010 年计划达 10 万吨, 2015 年将达到 15 万吨); 该公司千吨级纳米晶合金生产线已于 2004 年投产; 还由于日本政府和企业界积极投资大力开发能耗更小、磁感更高的新型非晶和纳米晶合金, 致使该产业进入了一个新的发展时期。

在我国, 从政府到产学研各界也都十分重视发展该产业。在节能、节资、环保循环经济的持续科学发展战略的指引下, 第一条万吨级非晶合金生产线已经于 2009 年 9 月下旬投产, 成为世界上第二个拥有万吨级非晶合金带材产能的国家; 国内多条百吨级纳米晶带材生产线已经运行多年, 使 Fe 基纳米晶软磁合金使用量大大超过了传统高导磁 Fe-Ni 系坡莫合金的产量 (2009 年产量估计达 4000 吨);

“北京非晶、纳米晶产业创新示范基地”、“北京非晶产业园”等的相继成立, 产、研、用密切合作, 使该产业向更广、更高端应用延伸; 近 2~3 年来, 国内有几十家企业申请了百余件有关高效节能非晶合金配电变压器 (AMDT) 及其它应用制品的专利。总之, 我国的非晶纳米晶材料产业也进入了欣欣向荣的发展时期。

无论是国外或国内, 该产业市场年需要量都以二位百分数数字增长。

本文主要介绍新型高 Bs ($B_s > 1.6T$) 低损耗非晶合金的最新研究进展。

2 新材料开发

现在大量用于工频配电变压器的非晶合金是牌号为 metglas2605SA1, 其成分为 $Fe_{80}Si_8B_{11}$, 它与传统的变压器铁芯材料——取向硅钢相比有两个显著的不足: 一是它的损耗虽小 (仅为取向硅钢的 $1/3 \sim 1/4$) 但 B_s 低 ($B_s < 1.6T$), 因此最大工作磁感 (B_m) 仅达 1.4T, 而取向 SiFe 可达 1.7T; 二是它的 λ_s 值达 $27 \sim 28 \times 10^{-6}$, 而取向 SiFe 的 λ_s 值仅为 $1 \sim 3 \times 10^{-6}$, 因此非晶铁芯配电变压器 (AMDT) 比取向硅钢铁芯变压器 (SiFeDT) 体积和噪音都大。新的非晶材料的开发首先就要改善这两方面的不足。

要使 B_s 增大, 必须提高 Fe 基非晶合金中 Fe 的含量, 例如要使 $B_s > 1.6T$, Fe 含量就须大于 80at% 以上, 但 Fe 含

量提高会使非晶形成能力 (GFA) 降低, 热稳定性下降 (见图 1[1]), 特别是当 $\text{Fe} \geq 82\text{at}\%$, 达 $86\text{at}\%$ 时, 很难在快淬薄带中得到单一均匀的非晶相。另外, 研究发现, 在提高 B_s 值的同时, 提高合金的矩形比, 不仅使达到工作磁感 B_m 所需的磁场 (H) 下降, 从而减少了磁性器件的励磁电流和功率, 高矩形比还使 B_m 处的磁化为畴壁移动过程 (不是畴转过程), 这样就可促使噪音减小。图 2[2] 为这一过程的示意图。

图 1 和 2 应是新的 Fe 基非晶合金设计的出发点。

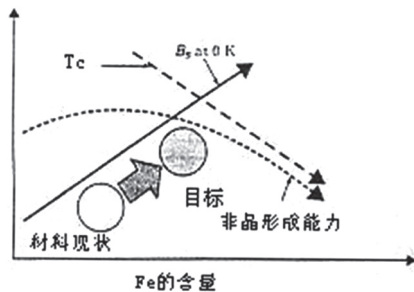


图 1 高Bs概念图[1]

Fig1 Concept for development of high Bs amorphous material

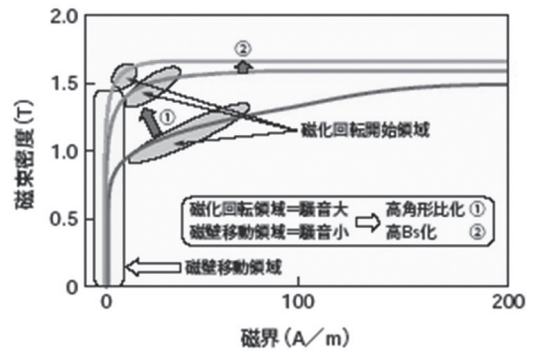


图 2 高矩形比造成低噪音化 [2]

Fig2 Lower noise caused by high squareness ratio

2003 年日立金属收购了美国 Honeywell 公司下属 Metglas 公司的万吨级非晶合金生产线后, 日美科技人员 (Y.Yoshizawa, R.Hasegawa 等) 于 2005 年推出可用于配电变压器等的磁性更好的新型非晶合金 Metglas 2605HB1[1~8]。表 1 和 2 分别列出了该合金性能的实验室水平和生产水平 ($0.025 \times 170\text{mm}$ 带) 并与现用合金 2605SA1 和 0.23mm 厚高取向硅钢作对比。

表1 变压器用铁芯材料特性比较 (实验室水平) [3]

Table1 Magnetic property comparison of cores for transformers (studied levels)

材料名	板厚 /mm	饱和磁感应强度 B_s/T	矫顽力 $H_c/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	铁损 $P_{1.3/50}/\text{WKg}^{-1}$	铁损 $P_{1.4/50}/\text{WKg}^{-1}$	饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s/10^{-6}$	电阻率 $\rho/\mu\Omega \cdot \text{m}$
2605HB1	0.025	1.64	1.5	0.063	0.072	+27	1.30
2605SA1	0.025	1.56	1.7	0.070	0.080	+27	1.30
取向硅钢	0.23	2.03	6	0.44	0.51	1~3	0.5

* 磁性能用单片样品测

表 2 新合金HB1和现用合金SA1的磁性生产水平比较[4、7]

Table 2 Magnetic peroperty comparison between HB1 and SA1 (produced levels)

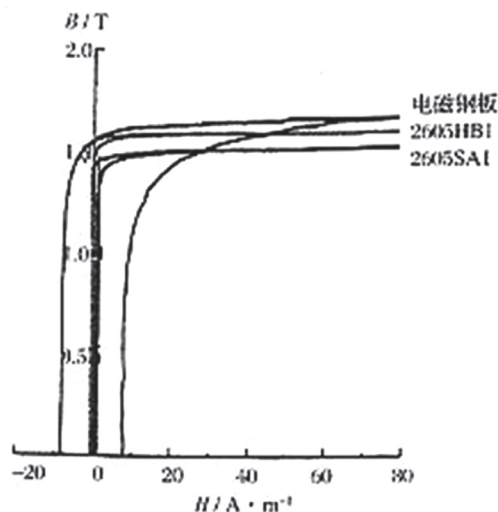
材料名	板厚 /mm	饱和磁感应强度 B_s/T	矫顽力 $H_c/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B_r/B_s	60Hz下铁损 $/\text{WKg}^{-1}$			
					$B_m=1.35\text{T}$	$B_m=1.4\text{T}$	$B_m=1.45\text{T}$	$B_m=1.5\text{T}$
2605HB1*	0.025	1.64	2.4	0.82	0.24	0.29	0.33	0.38
2605SA1**	0.025	1.56	3.4	0.79	0.27	0.32	0.35	/

*热处理工艺: $H=1.6\text{KA/m}$, $320^\circ\text{C} \times 1\text{h}$

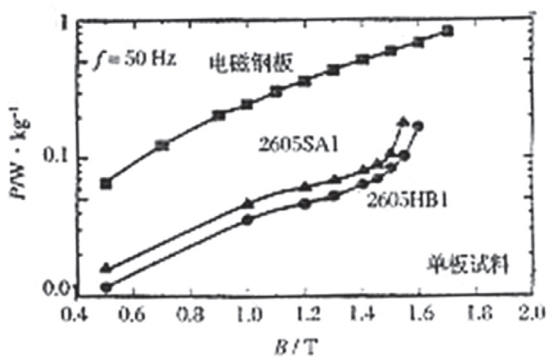
** 热处理工艺: $H=2.4\text{KA/m}$, $350^\circ\text{C} \times 2\text{h}$

由表可知, 新合金的磁性特点: B_s 高、 H_c 小, 方形比 B_r/B_s 高和铁损小。工作的磁感值 B_m 可达 1.5T , 这些都优于现用铁基非晶合金 2605SA1。图 3 列出新合金 2605HB1 的磁滞回线, 铁损 (P_c), 激磁功率 (S) 的特性曲线并与现用合金对比。图 4 为可听噪音的对比 [1, 6]。

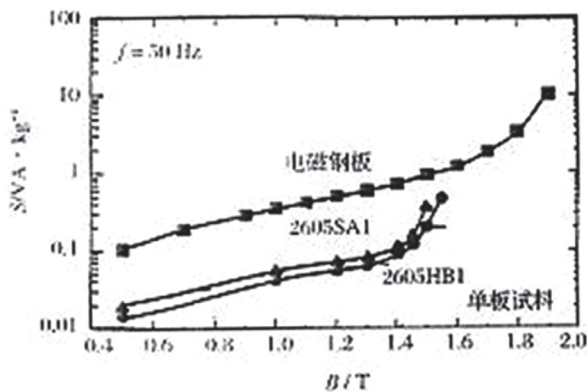
从 Y.Yoshizawa 和 R.Hasegawa 等人分别申请的专利 [4, 5] 获知, 2605HB1 合金的组成为 $\text{Fe}_a\text{Si}_b\text{B}_c\text{C}_d$ 系非晶态合金, 其中 $a=80\sim 83\text{at}\%$, $b=0.1\sim 5\text{at}\%$, $c=12\sim 18\text{at}\%$, $d=0.05\sim 3\text{at}\%$ 。杂质元素 (如 Mn、S、P、Al、Ti、Cu 等) 的总量不超过 $0.5\text{at}\%$ 。满足上述成分的合金具有如



(a)



(b)



(c)

图3 2605HB1合金的磁滞回线(a)、铁损(b)和激磁功率(c)的特性曲线并与现用合金(2605SA1,取向硅钢电磁钢板)比较[3]

Fig3 The curve of magnetic hysteresis loop(a), core loss(b) and exciting power(c) of 2605HB1 alloys properties comparison among 2605HB1 and current used alloys(2605SA1, oriented silicon steel)

下的性能和特点: $B_s \geq 1.6T$, $B_{90} \geq 1.55T$, $Br/B_s > 0.8$ 或 $B_{90}/B_s > 0.9$, $P_{1.4/50} \leq 0.28W/Kg$, $P_{1.5/50} \leq 0.5W/Kg$; 合金的 $T_c > 300^\circ C$, $T_{x1} > 400^\circ C$; 此外, 它还具有优异的热稳定性

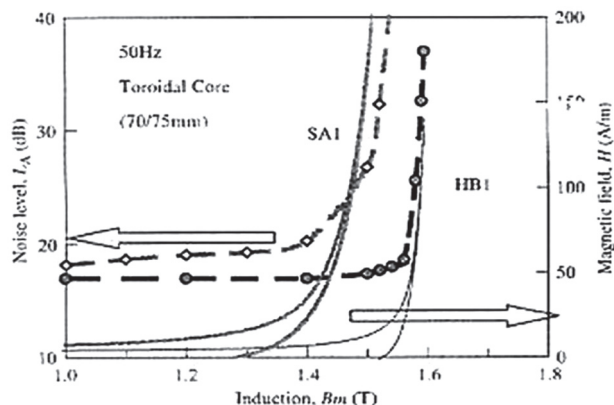


图4 最佳退火后HB1和SA1的磁滞回线、噪音与Bm关系

Fig4 Bm dependence of noise level together with the hysteresis loops at 50Hz for HB1 and SA1 materials annealed under the optimum conditions

和低的脆性(断裂应变 $\varepsilon \geq 0.02$), 应力松弛率 $R_s \geq 0.9$, 表面粗糙度 $Ra < 0.6 \mu m$, 叠片系数 $\geq 85\%$ 。因此, 快淬薄带的质量非常好。

生产该合金的技术关键是: 在制带时向辊咀间隙处的熔潭前辊面和熔潭吹送预定流速、压力和数量的 CO 或 CO₂ 气体。使薄带贴辊面内部距离表面 2nm~20nm 范围内形成 C 浓度高的偏析层及其峰值(C 峰值含量大大高于合金的标称 C 含量)。图 5 为吹送到冷却辊上气体的喷射压力与 C 偏析范围之间的关系(a)和各元素的浓度与距贴辊面表面深度的关系(b)[4]。此外还要严格控制成分, 特别是注意 Si 和 C 元素的组成比, 满足 $b \leq (0.5a-36)d^{1/3}$ 的要求(当 $a=82$ 时, $b \leq 5d^{1/3}$)。C 比 Si 有更大的 GFA, 而且它的加入不仅有利于磁性(增加 B_s 和 Br/B_s)且提高了熔体的流动性及其与冷却辊的可湿性。通过控制 C 和 Si 的含量比(b/d 小, 且 Si 的含量 $b \geq 3at\%$)以及 C 偏析层的范围和峰值(高时, 效果好)就可获得如上所述的表面粗糙度和脆性小、应力松弛率高、热稳定性好和 B_s 、 Br/B_s 高而铁损小的优质高铁含量($\geq 82at\%$)的非晶态合金带材。

表 3 列出一些上述 FeSiBC 系合金的成分和性能。推荐的 2605HB1 合金的成分是 $Fe_{81.7}Si_{16}C_{0.3}$ (Metglas Inc 申请中国专利 [5]) 或 $Fe_{82}Si_{16}C_2$ (日立金属申请中国专利 [4, 7])。

表 4 列出另外一些 B_s 值在 1.6T 以上的新铁基非晶合金的成分和性能 [9~13]。其中 FeSiB(M) 和 FeSiBC(M) ($M=Ni, Cr, Co, Mn$ 等) [9], 和上述 FeSiBC 系合金一样 B_s 可达 1.6T 以上; 而 FeSiBCP 系 [10、11], FeSiBCPN 系 [12] 和 FeSiBCSn 系 [13] 合金 B_s 可达 1.7T 以上, 但它

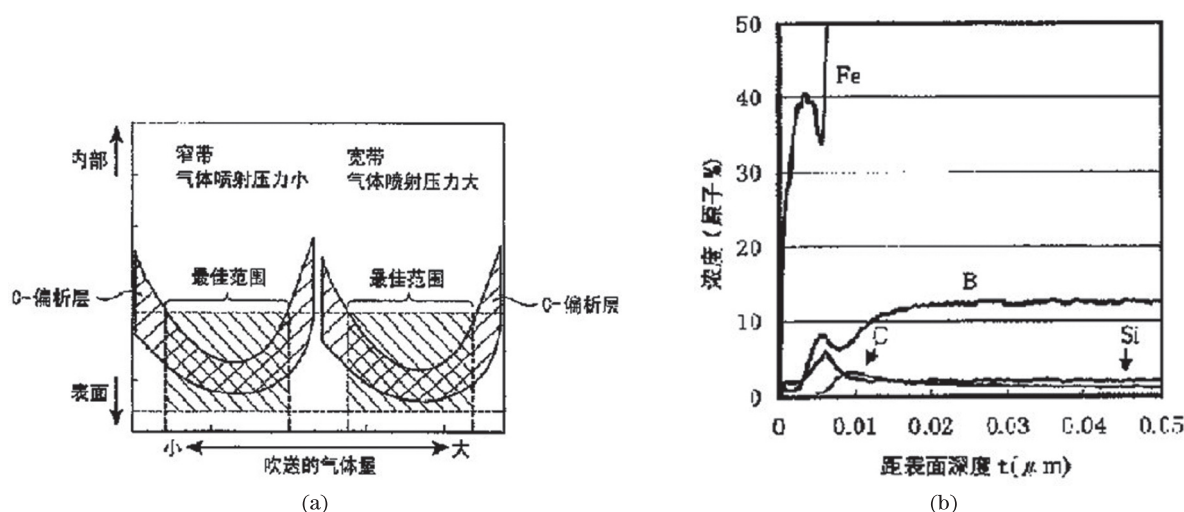


图 5 C偏析层深度随吹送气量变化的示意图(a)和各元素的浓度与距贴辊表面的深度关系曲线(b)[4]

Fig5 a is a schematic view showing the depth of a C-segregated layer changeable with the amount of a gas blown;

Fig5 b is a graph showing the relations between the concentrations of elements and a depth from a roll-contacting surface

表 3 某些FeSiBC系合金的成分和性能[4、5]

Table 3 Chemical compositions and properties of some FeSiBC alloys

成分 (at%)	Bs /T	B80 /T	B80/Bs	P _{1.3/50} /W/Kg	P _{1.4/50} /W/Kg	P _{1.5/60} /W/Kg	Tc /℃	Tx1 /℃	R _s [△] /%	ε [△]	C偏析层位置 /nm	C峰值 (at%)
Fe _{81.7} Si ₂ B ₁₀ C _{0.3}	1.650		0.85*	0.24**	0.29**	0.38	359	466				
Fe ₈₂ Si ₂ B ₁₄ C ₂	1.669	1.646	0.986	0.152	0.227	0.34	355	444	95	0.048	5-16	3.2
Fe ₈₂ Si ₁ B _{16.9} C _{0.1}	1.665	1.635	0.982	0.167	0.242				92	0.030	7-18	1.0
Fe ₈₂ Si ₁ B ₁₆ C ₁	1.661	1.640	0.987	0.163	0.238		353	451	94	0.041	7-16	1.8
Fe ₈₂ Si ₃ B ₁₄ C ₁	1.659	1.638	0.987	0.166	0.241		358	448	90	0.030	7-15	1.6
Fe ₈₂ Si ₄ B ₁₃ C ₁	1.656	1.614	0.975	0.178	0.257		358	450	91	0.034		
Fe ₈₂ Si _{0.1} B _{15.9} C ₂	1.666	1.639	0.984	0.158	0.233				95	0.026	6-17	3.5
Fe ₈₃ Si ₃ B ₁₃ C ₁	1.650	1.600	0.979	0.170	0.259		336	426	88	0.048	7-16	1.6

△R_s为应力松弛率, ε为断裂应变

* 为Br/Bs值, **为P_{1.3/60}和P_{1.4/60}之值

△△该合金的P_{1.3/60}=0.25和P_{1.4/60}=0.29单位为W/Kg

们的 B80 值都不高, 而且加 P、(P+N) 或 Sn 等元素会给生产工艺带来麻烦。含添加元素 M (M=Ni、Cr、Co、Mn 等) 的 Fe 基非晶合金使成本增加, 不利于和取向硅钢竞争, 但这一工作对利用混杂返回料生产低成本的 Fe 基非晶合金有参考作用。

总之, 新型 Fe 基非晶合金的 Fe 含量达 82at%, Bs 值和 B80 值都超过了 1.6T, 工作磁感 (Bm) 可达 1.5T, 而且在工频下的铁损比现用 2605SA1Fe 基非晶合金和取向硅钢低很多。

图 6 为退火温度 Ta 对新开发的 2605HB1(A) 和现用

Fe 基非晶合金 (B 和 C) 磁性的影响。新合金的最佳退火温度 (310℃ ~330℃) 比现用合金低 20℃ ~50℃。

老化试验表明 Tc 和 Tx1 均较高的新合金可以在 150℃ 以下工作一百年以上, 热稳定性极好。

图 7 为用 2605HB1、2605SA1 和取向硅钢作三相变压器铁芯的铁损 Pc 和噪音 La 特性的比较。表 5 为作单相 (20KVA、50Hz) 和三相 (500KVA、50Hz) 变压器的各项特性比较。可见与 2605SA1 相比, 新合金的铁损、噪音、工作磁感、变压器的总重量、体积或安装面积均有改善; 与取向硅钢相比, 无负荷损耗 (即空载损耗)、总能耗要小

表 4 某些高Bs(>1.6T)Fe基非晶合金的成份和性能

Table4. The composition and properties of some high Bs(>1.6T)Fe-based amorphous alloys

成分 (at%)	Bs /T	B ₉₀ /T	B ₉₀ / Bs	P _{1.3/50} /W/Kg	P _{1.4/50} /W/Kg	P _{1.5/50} /W/Kg	Tc /℃	R _{S△△} /%	ε 或D _f **	Ra ^{△△} /μ m
Fe _{83.9} Si ₂ B ₁₄ Cr _{0.1}	1.64	1.63		0.21	0.26			96.0		0.31
Fe ₈₂ Si ₂ B _{15.9} Ni _{0.1}	1.64	1.57		0.21	0.28			95.1		
Fe ₈₀ Si ₂ B ₁₆ Ni ₂	1.67	1.65		0.24	0.29			93.2		0.23
Fe ₈₂ Si ₂ B _{15.5} Cr _{0.5}	1.62	1.51		0.20	0.40			98.8		0.26
Fe _{86.7} Si _{2.3} B _{8.9} C _{0.8} P _{1.1} △	1.77	1.52		0.093						
Fe _{86.4} Si _{2.4} B _{6.2} C _{0.6} P _{4.2} △	1.76	1.52		0.092						
Fe _{86.5} Si _{3.5} B _{5.6} C _{0.4} P _{3.8} △	1.75	1.51		0.094						
Fe _{82.4} Si _{2.3} B _{8.8} C _{0.5} P _{5.8} △	1.74	1.51		0.091						
Fe _{81.97} Si ₂ B ₁₅ C _{0.93} P _{0.1} N _{0.004}	1.64*			0.116			376		D _f =3.1mm	
Fe _{85.8} Si ₁ B ₇ C ₆ P _{0.1} N _{0.1}	1.69*			0.173			368			
Fe ₈₂ Si ₂ B _{13.9} C ₂ Cr _{0.1}	1.64	1.61		0.20	0.23			97.2		
Fe ₈₂ Si ₂ B _{13.8} C ₂ Cr _{0.1} Ni _{0.1}	1.63	1.61		0.23	0.28			93		
Fe ₈₂ Si _{0.8} B _{16.6} C _{0.5} Cr _{0.1}	1.66	1.56	0.94	0.19	0.24			86		
Fe ₈₂ Si ₁ B _{15.9} C ₁ Mn _{0.1}	1.66	1.60	0.962	0.17	0.20			94		
Fe ₈₂ Si ₂ B _{13.9} C ₂ Mn _{0.1}	1.67	1.60	0.959	0.15	0.21			95		
Fe ₈₀ Si ₂ B _{15.9} C _{0.1} Co ₂	1.689	1.656	0.98	0.179	0.229			91	ε=0.029	
Fe ₈₀ Si ₂ B _{15.9} C _{0.1} Ni ₂	1.665	1.633	0.981	0.177	0.234			91	ε=0.027	
Fe ₈₀ Si ₂ B _{15.8} C _{0.1} Ni ₂ Mn _{0.1}	1.67	1.63	0.976	0.19	0.23			86		
Fe _{82.5} Si _{1.5} B ₁₄ C _{1.7} Sn _{0.3}	1.72	1.55		0.111		0.154				
Fe _{81.5} Si _{5.2} B ₁₂ C ₁ Sn _{0.3}	1.67	1.55		0.121	0.137	0.170				
Fe _{80.5} Si _{6.5} B ₁₂ C ₁ (Al _{0.05} Sn _{0.5})	1.58*	1.54		0.153	0.171					
Fe _{78.34} Si _{6.5} B ₁₂ C _{0.97} P _{0.13} N _{0.01} Cr _{0.05} Co ₂ Ni _{0.03}	1.79*			0.118			391		D _f =3.7mm	

△ 该合金还含有 0.2at% 的杂质，如 Mn、S 等

* 为 B₉₀₀ 值

** 断裂应变 $\epsilon = t / (D_f - t)$ t – 带厚，D_f – 弯曲断裂直径。

△△ 应力松弛率 $R_s = R_0 / R_1$ ，R₀ 和 R₁ 为退火前后带绕圆环的直径，Ra 表面粗糙度（贴辊面）

表5 2605HB1非晶变压器设计实例[2]

table 5 Design case for 2605HB1 amprhous transformers

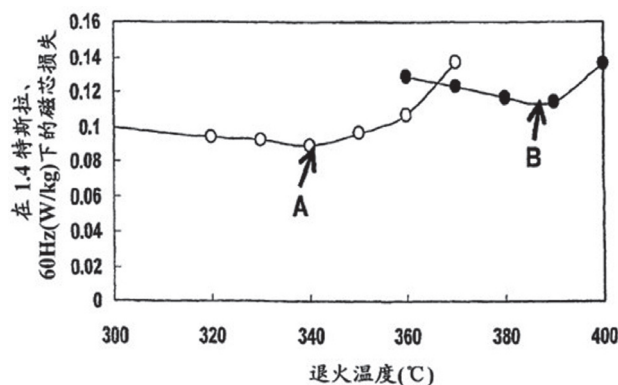
(a) 单相变压器设计例（20KVA 50Hz）

(b) 三相变压器设计例（500KVA 50Hz）

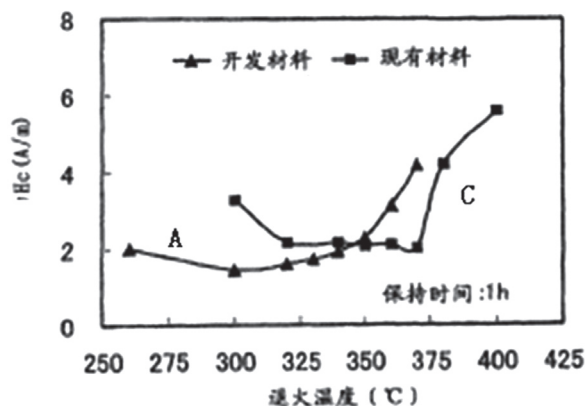
项目	非晶		硅钢		项目	非晶		硅钢
	HB1	SA1				HB1	SA1	
设计磁通密度(T)	1.45	1.30	1.72		设计磁通密度(T)	1.45	1.34	1.65
总质量(%)	86	100	74		总质量(%)	95	100	81
体积(%)	78	100	79		安装面积(%)	90	100	90
无负荷损(W)	17 (29)	17 (29)	58 (100)		无负荷损(W)	215 (32)	215 (32)	665 (100)
总损耗(W)	282 (87)	282 (87)	323 (100)		能耗(W)	1207 (89)	1207 (89)	1353 (100)
噪音(dB)	47	43	40		噪音(dB)	55	58	53

注：总质量、体积和安装面积以SA1合金为100%计

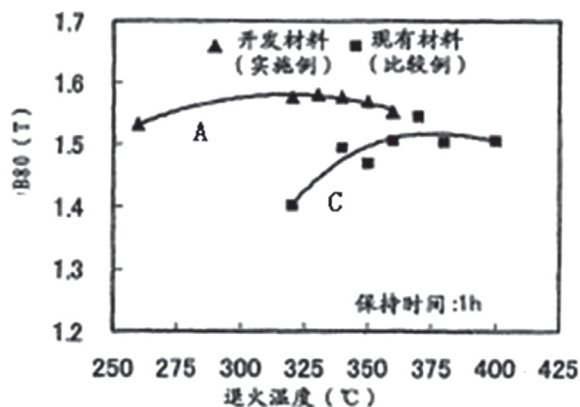
其他指标以硅钢为 100% 计——（ ）内值



(a)



(b)



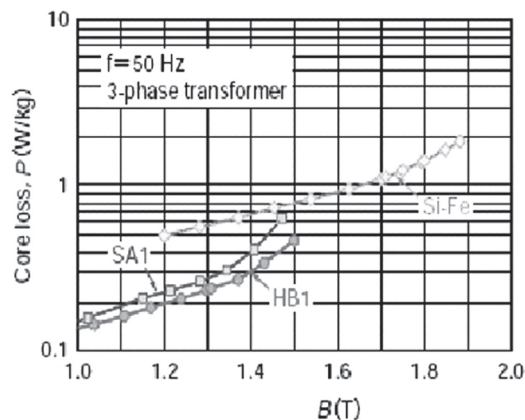
(c)

图6 新开发的2605HB1(A)和现用合金(B和C)的铁损 $P_{1.4/60}$ (a)、 H_c (b)和 B_{80} (c)与退火温度 T_a (保温1h)的相互关系[5、4]

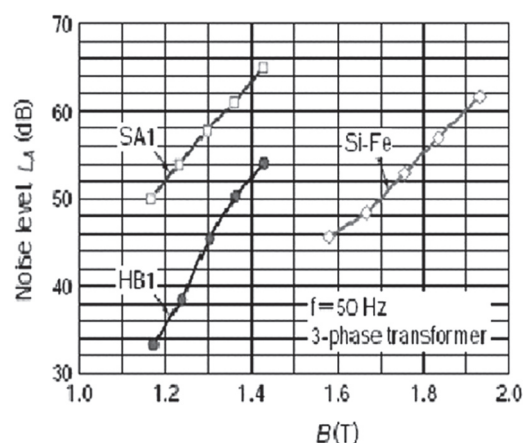
Fig6 The relationship between $P_{1.4/60}$ (a) & H_c (b) & B_{80} (c) and annealing temperatures T_a of 2605HB1(A) and usual alloy (B and C)

很多,只是体积和重量稍大。对配电变压器用不同铁芯材料的评估还可参阅文献[15、16]。

图8为日本各类变压器(工厂用三相500KVA)的负载损耗和无负载损耗的比较[2]。只有用铁基非晶(SA1和HB1)和细畴高取向硅钢做铁芯的变压器才超过“顶级运行”



(a)



(b)

图7 2605HB1、2605SA1和取向硅钢做三相变压器(500KVA, 50Hz)时的铁损 P_c (a)和噪声 L_A (b)比较[1、6]

Fig7 Bm dependence of the core loss P_c at 50Hz(a) and of noise level L_A (b) for the 3-phase transformer of grain-oriented silicon steel, 2605SA1 and 2605HB1 materials

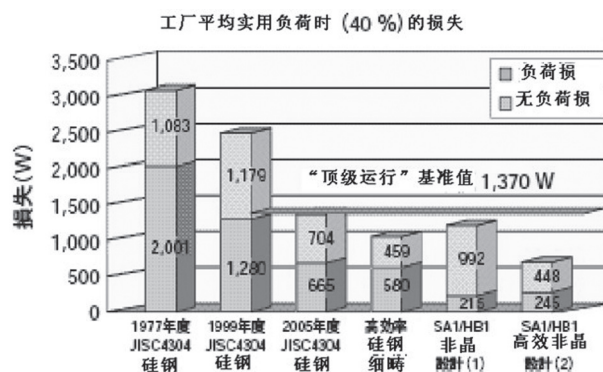


图8 商业用变压器损失比较(3相50Hz500kVA)

Fig.8 Loss comparison for industrial use transformers

型高效节能变压器的技术要求,而且非晶变压器有两种设计类型,一种是无负载损耗特低型,另一种是负载和无负载损耗都很低型。

用 2605HB1 做铁心的非晶变压器也在我国申请了专利 [14]。

最后应指出：就成分而言，新的 2605HB1 合金与早期研究的 FeSiBC 系四元合金的最佳磁性（高 Bs，低 Hc）的成分范围是一致的，以前所得的最佳成分为： $\text{Fe}_{81-82}\text{Si}_{2-4}\text{B}_{13-15}\text{C}_{1-3}$ ，其中 Bs 最高的成分为 $\text{Fe}_{82}\text{Si}_{2.5}\text{B}_{13}\text{C}_{2.5}$ 。2605HB1 的成分范围也包含了早先 Metglas 2605SC 的标准成分（ $\text{Fe}_{81}\text{Si}_{3.5}\text{B}_{13.5}\text{C}_2$ ），但研究工作更深入，磁性更好，生产工艺控制更严细，特别是对 Si/C 比、B80/Bs、表面 C 偏析层要求等，而带材质量要求也高（如表面粗糙度、应力松弛率、断裂应变和叠片系数等），若断裂应变 $\varepsilon \geq 0.02$ ，相当于 0.02mm 厚快淬薄带弯曲断裂时的直径不得大于 1mm；0.025mm 厚带则不大于 1.3mm。

参考文献

- [1] 小川雄一 et al. 日立金属技报, 2006. 22. 31
- [2] 新制品介绍, 日立金属技报, 2007. 23. 25
- [3] 吉尺克仁 et al. 工业材料, 2006. 54 (2). 58

- [4] 日立金属, CN1721563 (公开日 2006. 1. 18)
- [5] Metglas Inc. CN101167145A (公开日 2008. 4. 23)
- [6] Y. Ogawa et al. JMMM, 2006. 304. e675
- [7] R. Hasegawa. JMMM. 2006. 304. 187
- [8] D. Aznma et al. IEEE, Trans. Mag. 2008. 44 (11). 4104
- [9] 日立金属, CN1721567 (公开日 2006. 1. 18)
- [10] 新日铁, CN1547621 (公开日 2004. 11. 17)
- [11] 新日铁, CN1356403 (公开日 2002. 7. 3)
- [12] 新日铁, CN101194039 (公开日 2008. 6. 4)
- [13] 新日铁, JP5140703 (公开日 1993. 6. 8)
- [14] 日立产机 (株), CN101395682 (公开日 2009. 3. 25)
- [15] 东大地 et al. 日立金属技报, 2008. 24. 50
- [16] R. Hasegawa et al. JMMM, 2008. 320. 2451

作者简介

陈国钧 (1937-), 江苏宜兴人, 博士, 教授级高工。北京北冶功能材料有限公司材料研究室, 主要从事晶态、非晶态和纳米晶磁性材料的研究开发。